

时域反射计取样系统中单极性脉冲的设计

曹晓丽¹, 白泰礼²

(1.郑州大学西亚斯国际学院 电子信息工程学院,郑州 451100;2.电子科技大学 航空航天学院,成都 611731)

摘要:在时域反射计(TDR)取样系统中,单极性脉冲是用于开启取样门的关键信号.通过分析比较提出了一种基于雪崩三极管与阶跃恢复二极管(SRD)整形相结合的单极性脉冲发生电路.该电路避免了高压驱动等缺点,在保持脉冲幅度的前提下又得到了有效的脉冲底宽,通过实际的电路测试得到的单极性脉冲具有极宽的频谱、有效的脉冲宽度和幅度,符合取样系统的要求.

关键词:三极管;雪崩;超宽带脉冲;阶跃恢复二极管;取样

中图分类号:TN784

文献标志码:A

时域反射计(Time Domain Reflectometry, TDR)系统中的单极性脉冲是一种超宽带脉冲.超宽带脉冲有比较广的应用,如在探地雷达、冲击雷达系统、矿井下的超宽带通信技术中^[1].在不同的应用系统中,对超宽带脉冲指标的要求不一样,在 TDR 应用系统中,单极性脉冲主要用于打开或者关闭取样门,要求脉冲的平坦性要好、脉冲宽度要小、频谱要宽.目前在超宽带脉冲的研制上比较领先的仍然是美国,如美国的 Agilent 公司、Tektronix 公司、皮秒脉冲实验室(PSPL).虽然超宽带研究在国内起步晚,技术遭遇国外垄断,发展比较困难,但已有一定的基础,电子科技大学、重庆大学、西安交通大学、国防科技大学等在超宽带脉冲的探地雷达研究方面都有一定的实力.林春耀等^[2]利用数字逻辑器件的方法来研制的脉冲的底宽做到了 ns 级,脉冲幅度大概 2 V 左右.该方法受限于芯片带宽,如果做到 ps 级,成本比较高.陈宇晓等^[3]利用肖特基二极管或者阶跃恢复二极管(SRD)来产生.这种方法脉冲的底宽可以很窄,但是幅度很小,达不到 TDR 系统的要求.赵政等^[4]利用雪崩晶体管的倍增效应来产生.该方法可以利用雪崩管的串联产生脉冲的幅度高达几十伏,但是脉冲底宽仍然较大,同时多只雪崩管的串联需要高压.在该 TDR 系统中,利用单只雪崩管与 SRD 整形相结合的方法来产生超宽带脉冲.脉冲的幅度利用雪崩管的特性比用单纯的数字逻辑器件的幅度要高.同时利用 SRD 驱动电路,将脉冲的宽度做到 ps 级.

1 TDR 取样系统中的单极性脉冲

TDR 其重要的组成部分取样系统完成的功能是对入射信号与反射信号进行采样并且准确恢复出被取样信号,取样可以理解为一个开关的过程^[3].取样器在取样脉冲的驱动下周期性的打开关闭取样开关,从而获得与输入信号相关的一个输出信号^[5].取样定理表明要想将被取样信号没有失真的恢复出来,脉冲取样率要高于被取样信号最高频谱分量的 2 倍.因此,该取样脉冲的获得在此系统中至关重要.本系统采用四管平衡的步进等效时间取样系统,取样系统的设计框图如图 1 所示.

该系统的组成:单极性取样脉冲的发生电路、平衡不平衡转换电路、取样门、后续信号调理电路.电路的工作原理是取样脉冲发生电路产生取样脉冲,再经过平衡变换得到一对幅度相等、方向相反、相位对称的超宽带窄脉冲去开启关闭的取样门,使取样门完成取样动作.在本文中只研究单极性取样脉冲的产生方法.取样脉冲的形状类似于高斯脉冲.它有快速的上升和下降沿.

收稿日期:2017-10-13;修回日期:2018-01-24.

基金项目:河南省科技攻关项目(162102210110)

作者简介(通信作者):曹晓丽(1987—),女,河南禹州人,郑州大学西亚斯国际学院讲师,主要研究领域为应用电子技术、电气信息,E-mail:caoxiaoli788@163.com.

取样门选取为肖特基二极管,一般肖特基二极管的正向电压小于 0.5 V,可取样脉冲的幅度要大于 $\Delta = 1$ V,取样脉冲的幅度决定取样电路的输入动态范围,幅度越高,输入动态范围越宽,若选用取样脉冲总幅度为 $\Delta_0 = 5$ V,而对于频带为 3 GHz 的取样门电路来说,根据 $B_w = 0.35/\tau$ 及取样脉冲总底宽 $\tau_0 = \tau\Delta_0/\Delta$ ^[6],近似计算可得 $\tau_0 = 600$ ps,其中 τ 为取样脉冲的有效宽度,那么取样门电路对取样脉冲的要求即为其脉冲电压幅度要大于 5 V,脉冲底宽要小于 600 ps.

2 雪崩三极管的倍增特性

20 世纪 50 年代,雪崩三极管被公布于世,之后大家将雪崩三极管广泛地应用在脉冲的产生中.目前国内外都有关于利用雪崩三极管来产生脉冲的方法研究,尤其是国内,雪崩三极管的地位不可忽视^[7-9].

雪崩管有 4 个工作区域^[10-11].在 $I_B > 0$ 的时候,即基极的电流为正值,基极和射极处于正向偏置,集电极电流 I_C 随 I_B 成比例变化的区域是线性放大区,集电极电流 I_C 不随 I_B 显著变化的区域是饱和区;在 $I_B = 0$ 的特性曲线以下的区域为截止区;在 $I_B < 0$ 的时候,即基极的电流为负值,基极和射极处于反向偏置,集电极电流 I_C 随集电极电压 U_{CE} 和 $-I_B$ 急剧变化的区域是雪崩区.

三极管工作在雪崩区的原理是载流子的倍增效应.当基极与射极的 PN 结反向偏置时^[4],即基极电流 $I_B < 0$,集电极电流 I_C 随集电极电压 U_{CE} 和 I_B 急剧变化,三极管工作在雪崩状态,在此过程中,集电极电流

$$I_C = \alpha I_E = \alpha M I_E, \quad (1)$$

其中, α^* 为晶体管工作在雪崩区的电流放大系数, α 是晶体管工作在放大区的动态电流放大系数, M 为倍增系数也称为莫尔系数,其表征的是雪崩区域内电流倍增的程度^[10],即在雪崩区内集电极电流随集电极电压的增加比低电压区的集电极电流要大 M 倍.当三极管工作在雪崩区时,雪崩区的电流放大系数

$$\alpha^* = \alpha M, M = (1 - (\frac{U_{CE}}{V_{CBO}})^m)^{-1}, \quad (2)$$

其中, m 是与材料有关的系数, V_{CBO} 是射极开路集电极 - 基极之间的电压.

在一般的晶体管放大状态下共基极电流放大系数 α 与射极电流放大系数 β 的关系在雪崩状态下仍然可以成立,那么雪崩状态下有

$$\alpha^* = \frac{\beta^*}{\beta^* + 1}, \beta^* = \frac{\alpha^*}{1 - \alpha^*}, \quad (3)$$

$$\beta^* = \frac{M\alpha}{1 - M\alpha}. \quad (4)$$

将 $\beta^* = \infty$ 代入(1)~(3)式,联解(1)~(4)式,得到基极开路状态下,集电极-射极击穿电压

$$V_{CEO} \cong V_{CBO} \sqrt[m]{1 - \alpha} = V_{CBO} (1 + \beta)^{-\frac{1}{m}}. \quad (5)$$

由于从 V_{CEO} 到 V_{CBO} 的区域就是雪崩区域,由此可见雪崩状态直接受到 β 值的影响, β 值越大,管子的雪崩区域越宽.同时,雪崩管之所以能作为高速脉冲的加速的原因是因为三极管工作在雪崩区域的负阻特性.这意味着器件内部存在着强烈的正反馈.负电阻与一般消耗能量的正电阻相反,负阻在动态的情况下可以将能量释放^[12-13],从而促使雪崩管的二次击穿.这就是用雪崩管设计大电流高速脉冲源的原因.

通过以上的描述可以知道,在选择晶体管作为雪崩管时要具有以下特征:1) V_{CBO} 和 V_{CEO} 较高的,雪崩区尽量宽;2) β 值要尽量大;3) 特征频率要尽量高,开关时间要尽量快;4) 饱和压降 V_S 要尽量小.

3 电路设计

基于对雪崩管的分析,本文所设计的单极性脉冲的框图如图 2 所示.触发信号由时基电路产生,在此不

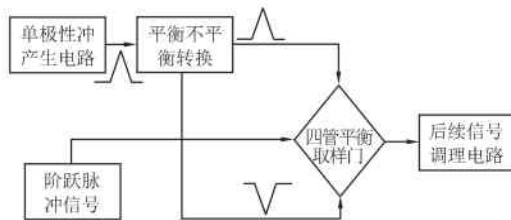


图 1 取样系统框图

再赘述.触发信号经过雪崩电路形成具有快速下降沿的脉冲,由于该脉冲的底宽和幅度都达不到取样门的要求,所以雪崩波形要经过 SRD 整形电路继续的加速整形,最后输出能够满足要求的单极性脉冲.



图2 单极性脉冲产生框图

3.1 雪崩电路设计

本文所设计的基于三极管雪崩效应的电路如图 3 所示.在本电路中,电源 $-E_b$ 、 R_b 以及稳压管 D 对基极构成负偏置电路, R_c 为静态负载电阻, C 为雪崩电容, R_L 为动态负载电阻.根据图列出的雪崩过程的方程式

$$\begin{cases} i = i_R + i_A, \\ U_{CE} = E_c - i_R R_c, \\ U_{CE} = u_c(0) - \frac{1}{C} \int_0^{t_A} i_A dt - i_A R_L, \end{cases} \quad (6)$$

其中, i 表示通过雪崩管的总电流, i_A 为雪崩时源自电容 C 上的雪崩电流, i_R 为通过静态负载电阻 R_c 的电流, $u_c(0)$ 为电容 C 的初始电压, t_A 为雪崩过程发生的时间.从而可以得到动态负载线方程

$$i_A = i + \frac{U_{CE} - E_c}{R_c}, U_{CE} = u_c(0) - \frac{1}{C} \int_0^{t_A} \left[i + \frac{U_{CE} - E_c}{R_c} \right] dt - \left[i + \frac{U_{CE} - E_c}{R_c} \right] R_L. \quad (7)$$

在具体的电路设计中,为了确保雪崩过程中雪崩电流基本上由雪崩管释放,通常有 $R_c \gg R_L$ ^[14].在雪崩过程中,雪崩电流 i_A 远大于静态电流 i_R ,所以有

$$U_{CE} = u_c(0) - \frac{1}{C} \int_0^{t_A} i dt - i R_L. \quad (8)$$

设 E'_c 为动态电源,且有

$$E'_c = u_c(0) - \frac{1}{C} \int_0^{t_A} i dt, \quad (9)$$

则 $U_{CE} = E'_c - i R_L$.

(1)~(9)式说明雪崩过程的动态负载主要由 R_L 决定,电路雪崩过程的波形如图 4 所示.经过雪崩过程,在输入脉冲的上升边沿处可以产生一个快速的下降沿脉冲.

3.2 SRD 整形电路设计

为了加速雪崩波形的前沿,通常采用的方法有 2 类:1)将多只雪崩管串联成脉冲发生器,但在使用多只雪崩管的情况下往往需要较高的直流高压供电^[15];2)采用多级阶跃恢复二极管的并联整形电路,在级联阶跃恢复二极管时为避免严重的多重反射,需要匹配网络连接.本文采用阶跃恢复二极管(SRD)组成的并联电路对雪崩后的波形继续进行整形,如图 5 所示.

电路由雪崩发生电路、SRD 整形电路、短路传输线以及 RC 匹配电路组成.其中最关键的器件是 SRD,它与普通的二极管有很多不同的用途,利用它的谐波可以制作高次倍频器和梳状谱发生器.它的主要的应用领域是脉冲整形和波形发生器.在所有的应用中,SRD 用作一个电荷控制开关^[16].在 SRD 正向偏置时,电荷进入到二极管,二极管表现为低阻特性.当电荷在转移时,二极管仍然表现为低阻,当所有的电荷都转移走时阶跃恢复二极管快速从低阻态变换成高阻态^[17-18].阶跃恢复二极管的这种存储电荷及快速改变阻抗值的特性被用于产生具有快速上升时间的脉冲和一般的脉冲整形.SRD 存储电荷和快速改变阻抗值的特性能够被开发用于产生快速上升时间的脉冲和脉冲整形.

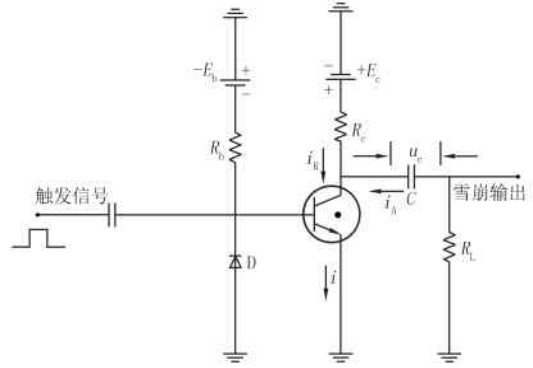


图3 三极管雪崩电路

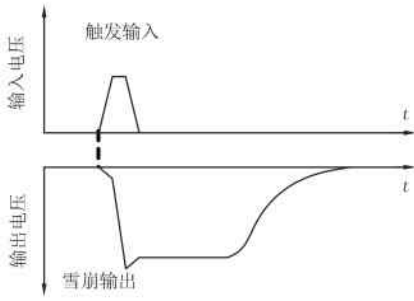


图 4 雪崩过程的波形

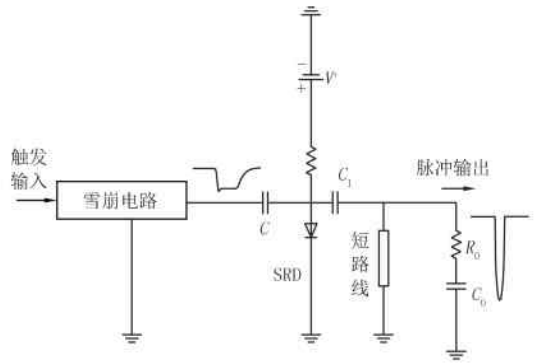


图 5 单极性脉冲发生电路

3.2.1 SRD 特性

SRD 的最明显的动态特性是内部存储电荷耗尽时其结阻抗变化非常快^[19-20].存储电荷的改变是因为少数载流子非零复合时间,少子是在正向偏置时注入 PN 结的.

正向偏置时存储的电荷可由电荷的连续性方程得到总的瞬态二极管电流 $i(t) = \frac{dQ}{dt} + \frac{Q}{\tau}$, 其中, Q 为 PN 结存储电荷, τ 为二极管的少子寿命.对于一个确定值的正向充电电流,存储的电荷 $Q_F = I_F(1 - e^{-t_F/\tau})$, 其中, I_F 为正向充电电流, t_F 为正向电流流经的时间.如果 $t_F \gg \tau$, 则有 $Q_F \approx I_F\tau$. 如果一个正向偏置的 SRD 突然加上一个反向电流偏置,首先 SRD 表现出一个非常低的阻抗(一般 $< 1 \Omega$),当存储的电荷被耗尽,阻抗将会突然增加到通常的反向高阻,因而阻止反向电流的流过.阻抗突变的时间一般小于 1 ns.正是 SRD 的这种特性,用一个确定值的反向电流吸收存储电荷,所需要的时间 $t_s = \tau \ln[1 + I_F(1 - e^{-t_F/\tau})/I_R]$, 其中, I_R 为反向电流.

如果 $t_F \gg \tau$, 则 $t_s \approx \tau \ln[1 + I_F/I_R]$. 这是理解在 SRD 内部电荷流动的基础.在很多的 SRD 电路中, $I_F/I_R \ll 1$. 由此可得 $t_s/\tau \approx I_F/I_R$. SRD 上电荷的存储于耗尽过程和关系式可以在图 6 中表示出.由于在正向导通时储存电荷,二极管的阻抗仍然很低,使二极管短路所需的时间是一个已设计好的时间 t_s . 这个时间,称为存储时间.由图 7 可以看出,其定义为在反向电流波形的 50% 点之间,或者等价于电路中有和没有二极管时两个输出波形的上升时间的 50% 之间.当存储电荷被耗尽时,储存阶段结束,二极管突然变成开路,导致脉冲波形发生器的输出直接加载到负载上.二极管反向电流的下降时间 t_r 也等于负载电压的上升时间, t_r 称为阶跃上升时间.这个时间是由二极管设计,电路组成和二极管运行条件决定的^[21-22].

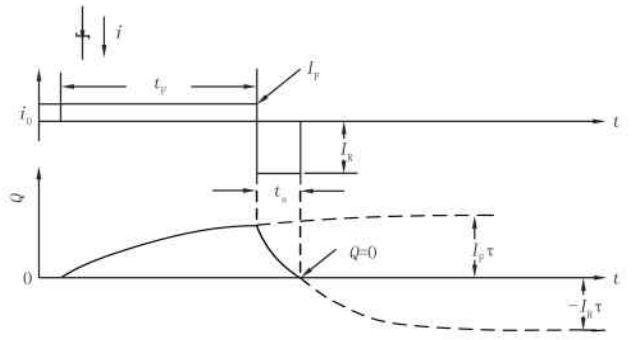


图 6 SRD 的电荷存储与耗尽过程

在图 7(b)中的输出上升时间明显比输入上升时间要快而且被延迟了 t_s . 对于一个给定的脉冲电压和信号源内阻,通过改变 I_F ,可以改变 t_s ,且 $t_s \gg t_r$ ^[23]. 因此,这个电路的输出上升时间远小于驱动波形的上升时间.事实上,一个上升时间为 10 ns 的脉冲用 1 个 SRD 可以被整形成上升时间为 300 ps 的输出,用 2 个或 3 个 SRD 可以实现上升时间为 50 ps 到 100 ps 的输出.

3.2.2 单极性脉冲的工作过程

在图 5 中由雪崩电路产生的雪崩波形经电容 C 耦合至 SRD 前沿整形电路,耦合电容 C 除了是雪崩电路的雪崩电容,还与 SRD 组成一个微分电路对雪崩脉冲的前沿进行微分,使得脉冲前沿的幅度急剧变大.经过 SRD 脉冲整形过后得到满足系统指标的单极性脉冲.

4 实验结果与分析

4.1 雪崩电路测试结果

根据上述电路的原理与分析,在实际的电路中利用 LeCroy 宽带示波器测试的输出波形如图 8 所示.雪崩的幅度为 1.5 V.该幅度能够有效地驱动 SRD 整形电路.

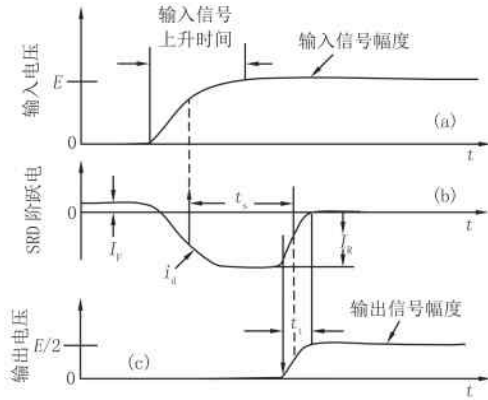


图 7 SRD 整形输入与输出关系

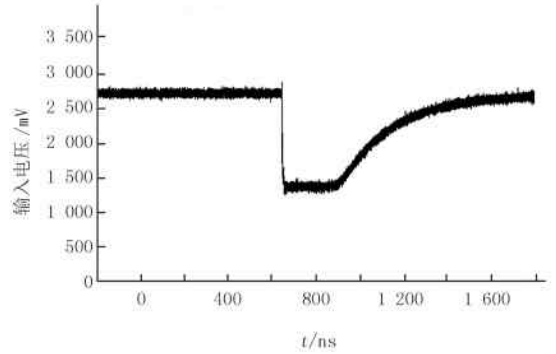


图 8 雪崩效应测试

4.2 单极性脉冲的产生

从图 9 可以看出波形的幅度达到 20 V,下降时间为 300 ps.再经过短路线反射叠加以及 RC 匹配网络后形成超宽带窄脉冲(图 10).

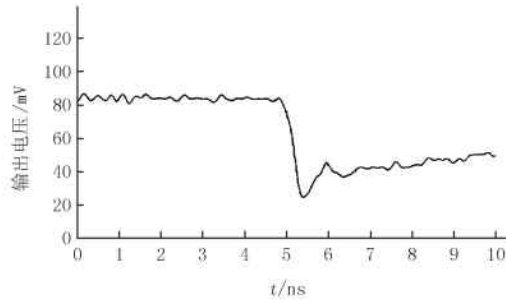


图 9 经 SRD 整形后的脉冲

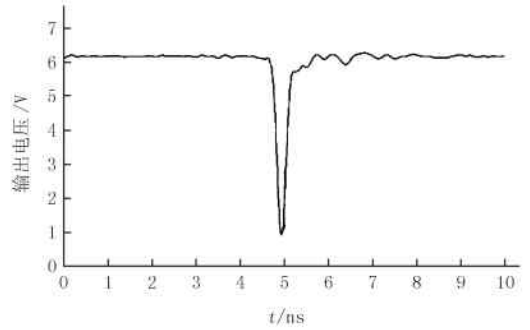


图 10 单极性脉冲

因为经短路传输线反射叠加形成的窄脉冲尾部存在严重的多重反射.为了消除脉冲尾部的反射,在此采用 RC 匹配网络来消除其影响.RC 匹配也称为交流负载匹配,其工作原理是:当信号加到 RC 匹配网络上时,对电容 C 进行充电,电路相当于短路,当充电完毕输出稳态电压.其特点是消除了负载端反射,而且没有直流功率损耗.设计要点是电阻 R 的值必需等于传输线的特性阻抗,以免引起多重反射.电容 C 的选择依据负载端的 RC 时间常数等于脉冲源的下降或上升沿.最终形成的超宽带单极性脉冲经测试,底宽为 500 ps,幅度达到 5.2 V,顶部平坦性良好,是一款性能优异的超宽带单极性脉冲,能够很好地在 TDR 取样系统中进行下一级的输入.

取样脉冲的作用是用于开启关闭的取样门,使取样门完成取样动作.它的形状类似于高斯脉冲,但是它的频谱中不具有高斯脉冲频谱中所含有的直流分量,低频分量也很少.它有快速的上升和下降沿,能量主要集中在高频部分.将图 10 所示的单极性脉冲经过 ADS 软件进行频谱分析,得到的频谱图如图 11 所示,可以

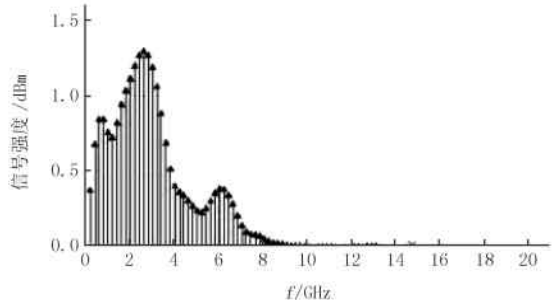


图 11 单极性脉冲频谱图

看到取样脉冲频谱能量集中在 1~3.5 GHz 范围内,后面的平衡变压器必须在这个频率范围内有很好的平衡性.

5 结 论

本设计根据对雪崩三极管的特性的描述来选择适合本设计电路的雪崩管,同时,在了解清楚 SRD 本身的特性后,设计 SRD 驱动电路是决定单极性脉冲宽度的关键,通过实际的设计与测试,排除影响脉冲宽度与幅度的因素,通过多次的实验与调试,测试得到的单极性脉冲,满足了对于 3G 带宽的取样门所需要的底宽和幅度以及频谱.

参 考 文 献

- [1] 郭宇,朱国富.超宽带穿墙雷达取样脉冲产生器设计[J].电讯技术,2014,54(9):1280-1285.
- [2] 林春耀,刘顺成,杨贤,等.基于高速数字电路的 PD UHF 信号纳秒级陡脉冲源研制[J].电测与仪表,2016,53(2):73-77.
- [3] 陈宇晓.超快电脉冲瞬态取样理论、方法核试验研究[D].成都:电子科技大学,2006.
- [4] 赵政,钟旭,李征,等.基于雪崩三极管的高中频高压纳秒脉冲产生方法综述[J].电工技术学报,2017,32(4):33-47.
- [5] GOU Yongsheng, LIU Baiyu, BAI Yonglin, et al. High-speed, high-voltage pulse generation using avalanche transistor[J]. The Review of scientific instruments, 2016, 87(5):064708.
- [6] Chen Y, Yin X, Tang D, et al. Design and simulation of 100ps transient sampling gate based on high speed Schottky diode[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(1):45-50.
- [7] KANNAN N, KUMAR J M. Schottky bipolar I-MOS: An I-MOS with Schottky electrodes and an open-base BJT configuration for reduced operating voltage[J]. Superlattices and Microstructures, 2017, 104(4):422-427.
- [8] TAI Huawang, YAN Mingzhang. Design and simulation of the avalanche transistor pulse generator[J]. Adv Mat Res, 2013, 760(9):92-95.
- [9] Kane D J. Recent progress toward real-time measurement of ultra short laser pulses[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1999, 35(4):421-431.
- [10] LIU Jinyuan, NIU Lihong, PENG Wenda, et al. Application of a fast electrical pulse in gated multichannel plate camera[J]. Review of Scientific Instruments, 2007, 78(5):055104.
- [11] Hu L, Su J, Ding Z, et al. All solid-state high repetitive sub-nanosecond risetime pulse generator based on bulk gallium arsenide avalanche semiconductor switches[J]. scientific & medical abstracts, 2016, 87(8):086107.
- [12] Setekera R, van der Toorn R. Compact model for non-local avalanche effect in advanced bipolar transistors; an assessment of the relaxation length and its temperature dependence[J]. Solid State Electron, 2016, 119:39-44.
- [13] Xue Peng, Fu Guicui. Analysis of the dynamic avalanche of carrier stored trench bipolar transistor (CSTBT) during clamped inductive turn-off transient[J]. Solid State Electronics, 2017, 129(3):35-43.
- [14] 李雪萍,王立,甘利萍,等.基于电阻加载技术的超宽带天线系统设计与实验[J].河南师范大学学报(自然科学版),2017,45(2):29-34.
- [15] Agilent. Pulse and Waveform Generation with Step Recovery Diodes[EB/OL].[2017-09-13]. <http://www.docin.com/p-235685784.html>.
- [16] Wang Xin, Tong Chuangming, Fu Hongwei. Power Consumption and Efficiency Analysis of the SRD-based UWB Pulse Generator[C]// Proceedings of 2010 IEEE International Conference on Ultra-Wideband. Piscataway: IEEE Press, 2010:1-4.
- [17] 屈义萍,刘四新,徐晓林.冲击脉冲型探地雷达等效采样方法的研究[J].电子测量技术,2010,33(1):8-10.
- [18] 牛有田,毕永兴.基于软件无线电的甚低频法探矿接收机[J].河南师范大学学报(自然科学版),2016,44(1):70-73.
- [19] Jiang C, Lane J, Song S T, et al. Single-electrode He microplasma jets driven by nanosecond voltage pulses[J]. Journal of Applied Physics, 2016, 119(8):083301.
- [20] 文超,钟俊.一种适用于 GPS 信号异常情况的高精度主时钟设计方法[J].电力系统保护与控制,2016,44(3):103-108.
- [21] 王俊.脉冲超宽带信号产生、控制与检测[D].合肥:中国科学技术大学,2007.
- [22] KAHRM M. 50 years of RF and microwave sampling[J]. IEEE Transactions On Microwave Theory And Techniques, 2003, 51(6):1787-1805.
- [23] 张泽宁,郝洪民,李京,等.脉冲注入法和单端故障行波法相结合的直流输电系统接地极线路故障测距[J].电力系统保护与控制,2017,45(20):117-122.

Synthesis and electrochemical investigation of sulfur/carbon-fiber cloth as flexible binder-free electrodes for lithium-sulfur batteries

Yuan Guanghui¹, Jin Huafeng¹, Zhang Yongguang²

(1.Department of Chemistry and Chemical Engineering, Ankang University, Ankang 725000, China;

2.Research Institute for Energy Equipment Materials; Tianjin Key Laboratory of Laminating Fabrication and Interface Control Technology for Advanced Materials, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: Sulfur/carbon-fiber cloth flexible electrodes was synthesized by a simple immersion process. The sulfur/carbon-fiber cloth flexible electrodes could be used pressed directly as cathode for lithium-sulfur battery without binder and conductive additive, thereby simplifying the manufacturing process. The sulfur/carbon-fiber cloth flexible electrode, which contained 56.77% sulfur in mass, showed good electrochemical performance. The discharge capacity of this electrode was as high as 1 394 mAh/g at 0.1 A/g. After 100 cycles at 0.1 A/g, the discharge capacity was still 733 mAh/g. This enhanced electrochemical performance could be attributed to the flexibility and conductivity of carbon fibers and the conductive matrix formed by carbon fibers.

Keywords: flexible sulfur/carbon-fiber cloth electrode; binder-free; sulfur cathode; electrochemical performance

[责任编辑 赵晓华]

(上接第 45 页)

The design of unipolar pulse of TDR sampling system

Cao Xiaoli¹, Bai Taili²

(1.School of Electronics and Information Engineering, Sias International University, Zhengzhou 451100, China;

2. School of Aeronautics and Astronautics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: In the sampling system of TDR, unipolar pulse is the key signal to open sampling gate. In this paper, an unipolar pulse generating circuit based on the avalanche triode and SRD shaping is proposed by analyses and comparisons. This circuit avoids the disadvantages such as high-voltage driving, and obtains the effective pulse bottom width under maintaining the pulse amplitude. In testing, the unipolar pulse with wide frequency spectrum, effective pulse width and amplitude satisfies sampling system's requirements.

Keywords: transistor; avalanche; ultra-wideband pulse; SRD; sampling

[责任编辑 杨浦]